

288 с. 5. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С.К.Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с. 6. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – 155 с. 7. Барбашиова Г.А., Вовченко А.И., Шомко В.В. Выбор формы задания мощности для численного решения обратной гидродинамической задачи восстановления кинематических и динамических характеристик разрядного канала // ЭОМ. – 2006. – № 3. – С. 54-57. 8. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1989. – 624 с.

*Поступила в редколлегию 22.03.2010*

УДК 621.586.785.3

**В.Ф.БЕЗОТОСНЫЙ**, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запорожье;  
**В.В.КОЗЛОВ**, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запорожье;  
**О.В.НАБОКОВА**, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запорожье

## **К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БАЗОВОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО МАГНИТОУПРУГОГО ДАТЧИКА**

У роботі представлена методика уточнення розрахунку вихідної характеристики магнітопружного датчика з урахуванням анізотропії матеріалу магнітопроводу та поверхневого ефекту.

The technique of the specified calculation of an output characteristic of magneto-elastic sensing element, taking into account the anisotropy of the material of a magneto-conductor and the superficial effect, is presented in the present work.

**Постановка проблемы.** Для систем управления автоматизированным оборудованием по силовому параметру актуален вопрос выбора унифицированного магнитоупругого датчика (МД) с условно повышенной гибкостью без концентраторов механических напряжений, с возможностью контроля знакопеременных усилий, отстройки от влияния продольных усилий, многодиапазонностью по усилию, распределенной структурой магнитной цепи. Также актуален вопрос повышения точности расчета характеристик МД на рациональных частотах намагничивания.

**Анализ базовой конструкции.** Наиболее полно предъявленным требованиям отвечает МД дифференциально-трансформаторного типа [1, 2], использующий одновременно эффекты сжатия и растяжения магнитопровода, принятый за базовый унифицированный элемент (рис. 1).

Магнитопровод МД имеет два окна, оси которых расположены параллельно продольной оси магнитопровода. На образованных стержнях 1, 2, 3

расположены намагничивающая  $w_n$  обмотка и секции  $w_{u1}$ ,  $w_{u2}$  измерительной  $w_n$  обмотки. Причем намагничивающая обмотка расположена на среднем недеформируемом стержне 1, а секции измерительной - на боковых стержнях 2 и 3. При действии усилия  $P$ , стержень 2 подвергается растяжению, а стержень 3 сжатию.

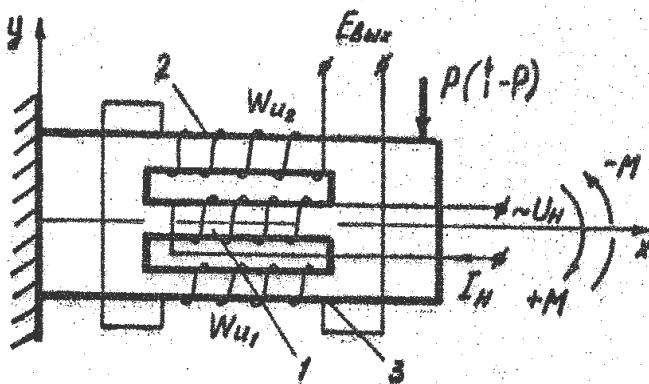


Рисунок 1 – Базовая конструкция магнитоупругого датчика

Достоинством базовой унифицированной конструкции МД является также способность контроля крутящих моментов  $+M$  и  $-M$  (эффект Видемана), и практически полная отстройка от сжимающих или растягивающих усилий, направленных по оси магнитопровода.

**Целью** настоящей работы является выработка технически обоснованных рекомендаций для построения на основе базового элемента МД многодиапазонных датчиков (рис. 2) за счет изменения места приложения усилия (рис. 2, а) или многосекционности магнитопровода (рис. 2, б).

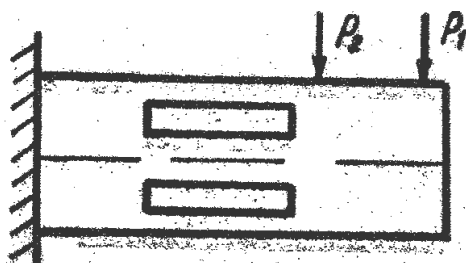
Так как длительность действия усилия  $P$  велико по сравнению с периодом собственных колебаний магнитопровода, оправдано применение методов классической механики Гюйгенса. Согласно [3] механические напряжения  $\sigma$  от силы  $P$  в любой точке объема магнитопровода базового датчика определяется соотношением

$$\sigma = \frac{P \cdot \alpha_{тек}}{W_y} = \frac{P \cdot \alpha_{тек} \cdot x_{тек}}{J_y}, \quad (1)$$

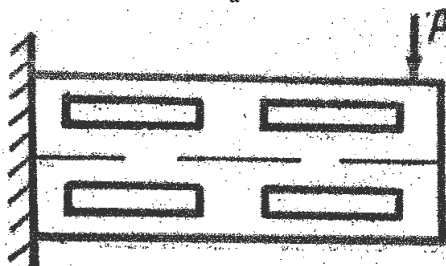
где  $\alpha_{тек}$ ,  $x_{тек}$  – текущие координаты;  $W_y$  – осевой момент сопротивления;  $J_y$  – осевой момент определяемый из выражения

$$J_y = J_y^{(1)} - 2J_y^{(2)},$$

где  $J_y^{(1)}$  и  $J_y^{(2)}$  – частичные осевые моменты инерции.



а



б

Рисунок 2 – Принципы построения много диапазоновых магнитоупругих датчиков:  
а – за счет изменения плеча; б – за счет многосекционного магнитопровода

Для сечения прямоугольной балки датчика, учитывая рис. 3, получим:

$$J_y^{(1)} = \frac{h \cdot b^3}{12}; \quad J_y^{(1)} = \frac{h \cdot b_1^3}{12} + h \cdot b_2^2 \cdot b_1,$$

где  $h, b, b_1, b_2$  – геометрические размеры магнитопровода.

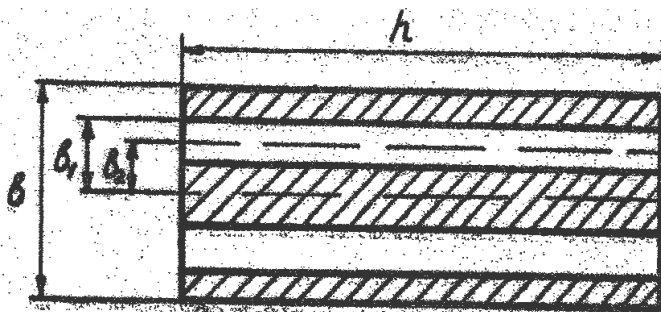


Рисунок 3 – Сечение балки датчика

Тогда осевой момент инерции равен

$$J_y = \frac{h \cdot b^3}{12} - 2 \left( \frac{h \cdot b_1^3}{12} + h \cdot b_2^2 \cdot b_1 \right),$$

а величина механических напряжений в любой точке магнитопровода [4]

$$\sigma = \frac{P \cdot \alpha_{\text{мек}} \cdot x_{\text{мек}}}{\frac{h \cdot b^3}{12} - 2 \left( \frac{h \cdot b_1^3}{12} + h \cdot b_2^2 \cdot b_1 \right)}. \quad (2)$$

Рассмотрим процессы, происходящие в магнитоупругом звене МД. Изменение магнитного потока при деформации ферромагнитного материала боковых стержней зависит от изменения его намагниченности, размеров, механических напряжений. Под действием механических напряжений изменится магнитная проницаемость материала. Относительное изменение магнитной проницаемости от величины механических напряжений определяется зависимостью

$$\frac{\Delta \mu_a}{\mu_\sigma} = \frac{1}{\pi} \mu_n \lambda_o \sigma,$$

а при достаточно малых изменениях магнитной проницаемости

$$\frac{\Delta \mu_a}{\mu_n + \Delta \mu_a} = \frac{1}{\pi} \mu_n \lambda_o \sigma.$$

Тогда абсолютное изменение проницаемости равно

$$\mu_\sigma = \frac{\frac{1}{\pi} \mu_n^2 \lambda_o \sigma}{1 - \frac{1}{\pi} \mu_n \lambda_o \sigma}. \quad (3)$$

В электромагнитном звене МД, за счет перераспределения магнитных потоков по боковым стержням, наведенная ЕДС в секциях измерительной обмотки будет равна

$$E_{\text{вых}} = 4,44 f_n w_u I_n w_n \left( \frac{1}{R_{M\sigma}} - \frac{1}{R_{Mo}} \right), \quad (4)$$

где  $f_n$  – частота намагничивающего тока;  $w_u = 2w_{u1} = 2w_{u2}$ ;  $I_n$  – величина намагничивающего тока;  $R_{M\sigma}$  – магнитное сопротивление участка магнитопровода при механических напряжениях в нем  $\sigma$ ;  $R_{Mo}$  – магнитное сопротивление при  $\sigma = 0$ .

Так как

$$R_{M\sigma} = l_M / \mu_\sigma S_M,$$

где  $l_M$  – длина участка, для которого определяется магнитное сопротивление,  $S_M$  – сечение участка магнитопровода, с учетом (3), выражение (4) примет вид

$$E_{\text{вых}} = 4,44 f_n w_u I_n w_n \frac{S_M \mu_n}{l_M} \left( \frac{\pi}{\pi - \mu_n \lambda_o \sigma} - 1 \right), \quad (5)$$

где  $\sigma$  – величина механических напряжений (2).

Полученная зависимость отражает основные процессы в механическом, магнитоупругом и электромагнитном звеньях МД, однако не учитывает ани-

зотропию магнитострикции. Обратимся к уточнению расчета выходной характеристики с учетом явно выраженной анизотропии магнитострикции в материале магнитопровода.

Допустим магнитопровод (рис. 4) имеет сечение однородных 1, 2, 3, 4 и 5 участков  $S_1, S_2, S_3, S_4$  и  $S_5$ , длины участков соответственно  $l_1, l_2, l_3, l_4$  и  $l_5$ . Примем что  $S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_5 / 2$ ,  $l_1 / 2 = l_3 / 2 = l'$ ,  $l_2 = l_4 = l_5 = l$ . Для упрощения анализа процессов перейдем от дифференциально-трансформаторной к эквивалентной дроссельной схеме магнитопровода (рис. 5) с удвоенной толщиной магнитопровода ( $2d$ ), а следовательно и сечениями ( $2S$ ). Тогда эквивалентное магнитное сопротивление магнитопровода  $R_M = 2R_{M1} + 2R_{M2}$ , где  $R_{M1}, R_{M2}$  - магнитные сопротивления соответственно 1-го и 2-го участков.

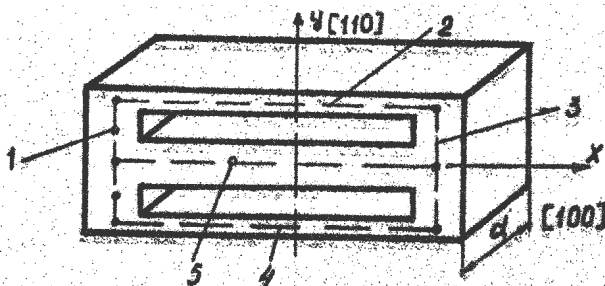


Рисунок 4 – Магнитопровод датчика

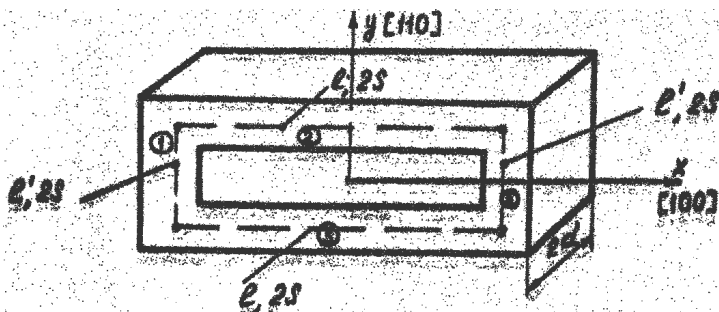


Рисунок 5 – Эквивалентная дроссельная конструкция магнитопровода датчика

Так как  $R_{Mi} = l_i / \mu_i S_i$ , направление кристаллографической оси  $[100]$  совпадает с осью  $x$  датчика, а  $[110]$  с осью  $y$ , получим

$$R_M = \frac{1}{S} \left( \frac{l}{\mu_{[100]}} + \frac{l'}{\mu_{[110]}} \right). \quad (6)$$

Положим, что  $l' = l/a_1$ , а  $\mu_{[110]} = \mu_{[100]}/a_2$ , где  $\mu_{[100]}$ ,  $\mu_{[110]}$  – магнитная проницаемость в направлении кристаллографической оси [100] и [110] – соответственно,  $a_1$  – коэффициент линейных размеров,  $a_2$  – коэффициент анизотропии.

Тогда выражение (6) перепишем в виде

$$R_M = \frac{1}{S} \left( \frac{l}{\mu_{[100]}} + \frac{l \cdot a_2}{a_1 \cdot \mu_{[100]}} \right) = \frac{l}{S \cdot \mu_{[100]}} \left( 1 + \frac{a_2}{a_1} \right). \quad (7)$$

Таким образом, при расчете выходных характеристик МД, магнитопровод которых изготовлен из материалов с явно выраженной анизотропией, следует выражение (5) уточнять с учетом (7)

$$E_{вых} = 4,44 f_n w_n I_n w_n \frac{S_M \mu_{n[100]}}{l_M (1 + a_2/a_1)} \left( \frac{\pi}{\pi - \mu_{n[100]} \lambda_o \sigma} - 1 \right). \quad (8)$$

где  $f_n$  – частота намагничивающего тока.

Полученная зависимость позволяет рассчитывать выходные характеристики МД при квазистационарных режимах измерений на низких частотах намагничивающего тока.

Однако рациональная частота намагничивающего тока обычно значительно выше промышленной частоты [1, 5, 6].

С целью обоснования методики уточненного расчета МД на рациональных частотах остановимся кратко на физических процессах, происходящих в материале магнитопровода, при намагничивании ферромагнетика переменным магнитным полем.

На рис. 6 схематично показаны три пластины пакета магнитопровода. Предположим, что поток  $\Phi$  проходит в пакете в направлении оси  $Oz$ , а влиянием остальных листов пренебрегаем. Так как магнитное поле в пакете гармонически изменяется во времени то справедливы известные дифференциальные уравнения для векторов напряженности магнитного и электрического поля [7]

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{H}}{dx^2} &= \dot{k}^2 \dot{H}; \\ \frac{d^2 \dot{E}}{dx^2} &= \dot{k}^2 \dot{E}, \end{aligned}$$

где:  $\dot{k}^2 = j\omega \mu_a$ ,  $\omega$  – угловая частота;  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость материала магнитопровода.

Решение этих уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{H} &= H_1 e^{\dot{k}x} + H_2 e^{-\dot{k}x}; \\ \dot{E} &= E_1 e^{\dot{k}x} + E_2 e^{-\dot{k}x}. \end{aligned}$$

Учитывая требование симметричности, то есть чтобы на краях пластин  $H_{(x=b)} = H_{(x=-b)}$  при  $2b \leq h$ , и пренебрегая краевым эффектом на гранях  $y = \pm h/2$  как весьма незначительным, получим при  $x = \pm b$

$$\begin{cases} H_o = H_1 e^{kb} + H_2 e^{-kb} \\ H_o = H_1 e^{-kb} + H_2 e^{kb} \end{cases} \quad (9)$$

где  $H_o$  – эффективное значение напряженности магнитного поля.

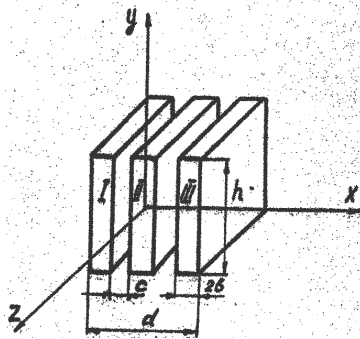


Рисунок 6 – Пластины шихтованного магнитопровода датчика

Тогда постоянные интегрирования будут равны

$$H_1 = H_2 = \frac{H_o}{\operatorname{ch} kb},$$

а выражения для напряженности и индукции магнитного поля имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{H} &= H_o \frac{\operatorname{ch} kx}{\operatorname{ch} kb}; \\ \dot{B} &= \mu_a H_o \frac{\operatorname{ch} kx}{\operatorname{ch} kb}. \end{aligned} \quad (10)$$

Распределение магнитной индукции по сечению одной пластины схематично показано на рис. 7. По одной пластине проходит магнитный поток [7]

$$\dot{\Phi} = \int_{-b}^b h \dot{B} dx = \frac{2ah\mu_a}{1+j} H_o \operatorname{th}(1+j) \frac{b}{a}. \quad (11)$$

и среднее значение магнитной индукции в пластине будет равно

$$B = \mu_a H_o \frac{b}{a} \sqrt{\frac{\operatorname{ch}(2b/a) - \cos(2b/a)}{\operatorname{ch}(2b/a) + \cos(2b/a)}}. \quad (12)$$

где  $a$  – глубина проникновения магнитного поля ( $a = \sqrt{2/w\mu_a\gamma}$ ).

Так как суммарный магнитный поток  $\Phi_c$  является суммой частных потоков в отдельных пластинах, то для пакета высотой  $d$  и толщиной  $h$ , при зазоре между пластинами, равном нулю ( $c = 0$ ), имеем

$$\Phi_c = \frac{adh}{(1+j)b} \mu_a H_o \operatorname{th}(1+j) \frac{b}{a}. \quad (13)$$

С другой стороны

$$\Phi_c = \mu_\phi h d H_o, \quad (14)$$

где  $\mu_\phi$  – фиктивная магнитная проницаемость материала, учитывающая потери на вихревые токи [8].

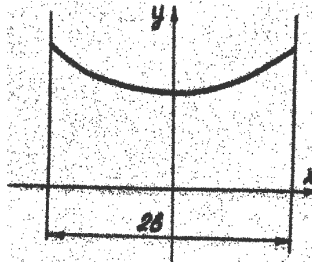


Рисунок 7 – Распределение магнитной индукции по сечению одной пластины

Учитывая соотношения (13) и (14), получим

$$\mu_\phi = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{\mu_n}{2\pi f_n \gamma}} \cdot \sqrt{\frac{\operatorname{ch}(2b/a) - \cos(2b/a)}{\operatorname{ch}(2b/a) + \cos(2b/a)}}. \quad (15)$$

Таким образом, введение фиктивной магнитной проницаемости позволяет учитывать неравномерность распределения индукции и напряженности магнитного поля по глубине пластин. При этом можно считать, что величина магнитной индукции и напряженности поля по глубине пластин одинаковые и равны некоторой фиктивной индукции и напряженности на их поверхности, что значительно упрощает расчет магнитоупругих датчиков и повышает точность расчета их выходных характеристик.

Реально аргумент гиперболической и тригонометрической функций достаточно велик ( $2b/a \geq 10$ ), поэтому в этом случае значения гиперболических функций значительно превышает значения тригонометрических функций, то есть

$$\lim_{2b/a \geq 10} \sqrt{\frac{\operatorname{ch}(2b/a) - \cos(2b/a)}{\operatorname{ch}(2b/a) + \cos(2b/a)}} \approx 1.$$

С учетом этого соотношения (12) и (15) примут вид

$$B = \mu_a H_o \frac{a}{b},$$



$$\mu_{\phi} = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{\mu_n}{2\pi f_n \gamma}} \quad (17)$$

Как показали расчеты, погрешность при переходе от соотношения (15) к (17) при  $f_n \geq 500$  Гц не превышает 0,1 %. Предполагаем также, что величина воздушных зазоров между пластинами на порядок меньше толщины самих пластин. На рис. 8 показаны зависимости  $\mu_{\phi}$  от частоты намагничивающего тока при различных значениях начальной магнитной проницаемости. Толщина пластин магнитопровода  $2b = 0,2$  мм, удельная электрическая проводимость материала  $\gamma = 6 \cdot 10^6$  Сим/м.

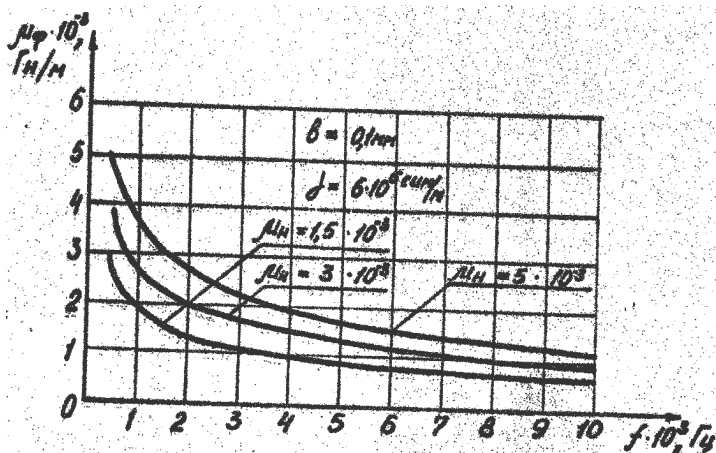


Рисунок 8 –Зависимости фиктивной магнитной проницаемости от частоты намагничивающего тока

Как видно из рис. 8, девиация частоты при низкочастотном намагничивании, вызванная к примеру нестабильностью генератора, сильно влияет на значение фиктивной магнитной проницаемости, а следовательно и на девиацию выходной ЕДС, что вызывает (может весьма значительно при больших  $\mu_n$ ) погрешность измерения усилий. При частотах более 500 Гц указанный эффект проявляется в значительно меньшей мере и при частоте 1 кГц девиация частоты  $\Delta f_n = 1$  % вызовет незначительную девиацию фиктивной магнитной проницаемости ( $\Delta \mu_{\phi} = 0,12$  %).

### Выводы.

- 1 Показано, что работа базовой конструкции датчика имеет ряд особенностей, которые должны быть учтены при их проектировании.
- 2 Исследованы процессы в механическом, магнитоупругом и электро-

магнитном звеньях базовой унифицированной конструкции МД. Установлена связь между выходным сигналом и влияющими параметрами звеньев.

- 3 Показана возможность построения многодиапазонных датчиков на основе базовой конструкции за счет изменения места приложения усилия или многосекционности магнитопровода.
- 4 Получено аналитическое выражение для магнитной проницаемости материалов магнитопровода как функция начальной проницаемости, коэффициента магнитострикции и значения механических напряжений.
- 5 Предложена методика уточнения расчета выходной характеристики датчика с учетом анизотропии магнитострикции в материале магнитопровода.
- 6 Предложена методика повышения точности расчета характеристик МД на повышенных частотах намагничивания за счет введения фиктивной магнитной проницаемости, учитывающей поверхностный эффект.

**Список литературы:** 1. *Безотосный В.Ф.* Современные подходы и перспективные направления разработки систем управления по силовому параметру / *В.Ф.Безотосный, В.В.Козлов, О.В.Набокова* // *Электротехника та електромеханіка*. – 2008. – № 3. – С. 5-6. 2. *Безотосный В.Ф.* Повышение метрологических характеристик измерительных дифференциальных преобразователей / *В.Ф.Безотосный, Е.В.Власенко* // *Тижень науки : наук.-техн. конф.*, 10-14 квіт. 2006 р. : тез. доп. / *Зап. нац. техн. ун-т. Запоріжжя*, 2006. С. 43-44. 3. *Федосеев В.М.* Сопротивление материалов / *В.М.Федосеев*. – М.: Наука, 1987. – 540 с. 4. *Безотосный В.В.* Вопросы унификации и динамические характеристики магнитоупругих датчиков для каналов обратной связи устройств управления автоматизированным оборудованием / *В.Ф.Безотосный, Ю.Е.Нитусов* // *Запорожье*, 1988. – 11 с. – Рукопись представлена Запорожским машиностроительным институтом им. В.Я.Чубаря. – Деп. в УкрНИИТИ 20.03.88. – №748 – Ук88. 5. *Безотосный В.Ф.* Використання частотно-балансного методу в системах керування обладнанням за силовим параметром / *В.Ф.Безотосный, В.В.Козлов* // *Тижень науки : наук.-техн. конф.*, 14-18 квіт. 2008 р. : тез. доп. / *Зап. нац. техн. ун-т. Запоріжжя*, 2008. – С. 131-132. 6. *Безотосный В.Ф.* Некоторые особенности проектирования электромагнитных преобразователей усилий на рациональных частотах намагничивания / *В.Ф.Безотосный, В.В.Козлов, О.В.Набокова* // *Вестник национального технического университета «ХПИ»*. Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2008. – № 44. – С. 19-24. 7. *Ламмерьянер И.* Вихревые токи / *И.Ламмерьянер, М.Штафль*. – М.: Энергия, 1987. – 210 с. 8. *Безотосный В.Ф.* Теоретико-цепная модель магнитоупругих датчиков, вопросы их применения и расчета / *В.Ф.Безотосный, Л.А.Смирнова* // *Труды МВТУ им. Н.Э.Баумана*. – № 491. – С. 77-84.

*Поступила в редколлегию 04.03.2010*